

УДК 621.315.2.027.8

**В. М. Золотарев**, канд. техн. наук (ЗАО "Завод "Южкабель", Харьков), **А. А. Щерба**, член-корр. НАН Украины, **А. Д. Подольцев**, докт. техн. наук (Институт электродинамики НАН Украины, Киев)

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНОГО КАБЕЛЯ В НАКЛОННОЙ ЭКСТРУЗИОННОЙ ЛИНИИ**

*Выполнено моделирование на основе пакета Matlab/Simulink/SimPowerSystems электромеханической системы, состоящей из трех электроприводов на основе асинхронных двигателей, регулирующих движение сверхвысоковольтного кабеля в наклонной экструзионной линии. Проведено согласование электромеханических параметров двух приводов системы и выполнена оценка допустимого провала напряжения питающей сети при предельной массе движущегося кабеля.*

*Виконано моделювання на основі пакета Matlab/Simulink/SimPowerSystems електромеханічної системи, яка складається з трьох електроприводів на основі асинхронних двигунів, що регулюють рух надвисоковольтного кабелю у похилій екструзійній лінії. Проведено узгодження електромеханічних параметрів двох приводів системи та зроблено оцінку припустимого провалу напруги мережі живлення при граничній масі кабелю, що рухається.*

**Введение.** Современный этап развития электромеханических систем характеризуется переходом к регулируемым электроприводам переменного тока на основе асинхронных двигателей с частотным управлением, которые имеют высокие динамические и энергетические показатели. В то же время при использовании в одной системе двух и более регулируемых приводов существенно усложняется решение проблемы согласования совокупности их электрических и механических параметров. При выборе оптимальной структуры блока управления всей системы возникает необходимость моделирования сложных электродинамических процессов, что в настоящее время наиболее целесообразно осуществлять с использованием пакета Matlab/Simulink/SimPowerSystems. Такой подход позволяет исследовать законы частотного регулирования и определять наиболее целесообразные режимы системы в отношении ее устойчивости, быстродействия и других показателей [6,9].

При эксплуатации системы приводов возникает также задача исследования стабильности их работы при изменении параметров питающей сети, что особенно актуально при возникновении максимальных механических нагрузок приводов и их питания от системы электроснабжения с ограниченной установленной мощностью обслуживаемой подстанции. Применение методов компьютерного моделирования для решения задач такого типа позволяет значительно сокращать материальные затраты и сроки проектирования таких систем.

В данной работе производится оценка стабильности работы электромеханической системы с векторным управлением частотно-регулируемых приводов при возникновении кратковременных изменений напряжения питающей сети. Известно [9,10], что достоинствами векторного управления являются высокая точность отработки заданной скоростной диаграммы, сохранение необходимой величины момента при малых частотах вращения, плавность работы двигателя и быстрая реакция на скачки нагрузки вследствие высокой динамики регулирования. В то же время вопросы количественного анализа стабильности работы и точности отработки заданных параметров – скорости движения и момента на валу двигателя – в настоящее время исследованы недостаточно.

Цель данной работы заключается в том, чтобы на основе современных методов компьютерного моделирования с использованием пакета программ Matlab/Simulink/SimPowerSystems исследовать динамические и электромагнитные процессы электромеханической системы, состоящей из трех частотно-регулируемых электроприводов на базе асинхронных двигателей, которые управляют движе-

нием сверхвысоковольтного кабеля в наклонной экструзионной линии при появлении кратковременных провалов напряжения питающей трехфазной сети. Исследование проводится для согласования электромеханических параметров двух приводов системы и выполнения оценки допустимого провала напряжения питающей сети при предельной массе движущегося кабеля.

Излагаемый материал основан на результатах компьютерного моделирования электромеханической системы, включающей два асинхронных двигателя с векторным управлением, с использованием научных положений, представленных в работах [11–13]. При синтезе виртуальной модели использованы инструментальные средства пакета программ компьютерного моделирования Matlab/Simulink, который содержит специальные блоки и демонстрационные примеры, касающиеся непосредственно элементов и систем автоматизированного электропривода. Принципы построения и исследования отдельных блоков виртуальных моделей изложены в работах [2,3,5], а систем управления электроприводами – в монографии [4].

**Описание наклонной линии.** Наклонная экструзионная линия выполняется в виде металлической вулканизационной трубы, внутри которой происходит экструзионное нанесение и вулканизация (сшивание) слоя полиэтиленовой изоляции и двух полимерных полупроводящих слоев на токопроводящую жилу кабелей высокого и сверхвысокого напряжения. В такой линии изготавливают изоляцию алюминиевых и медных жил силовых кабелей сечением 35–2000 мм<sup>2</sup> на напряжение 10–330 кВ. Жила состоит из многих скрученных и уплотненных проводников, которые могут быть разделены на 5–7 отдельно уплотненных и изолированных секторов. На жилу наносится полимерный полупроводящий слой толщиной 0,4–3 мм, на который наносится изоляционный слой из высококачественного полиэтилена толщиной до 28 мм и еще один слой из полупроводящего полиэтилена толщиной 0,4–3,5 мм. Все три слоя наносятся одновременно методом экструзии с помощью тройной экструзионной головки и вулканизируются в вулканизационной трубе непрерывной вулканизации при температуре 450° С в среде сжатого до 16 атм. азота в газообразном состоянии.

Токопроводящая жила кабеля с нанесенными на нее полиэтиленовой изоляцией и полупроводящими экранирующими слоями должна перемещаться со скоростью 0,3–50 м/мин внутри вулканизационной трубы длиной 172 м. Движение осуществляется в результате создания усилий до  $4,5 \cdot 10^4$  Н электроприводом № 1.

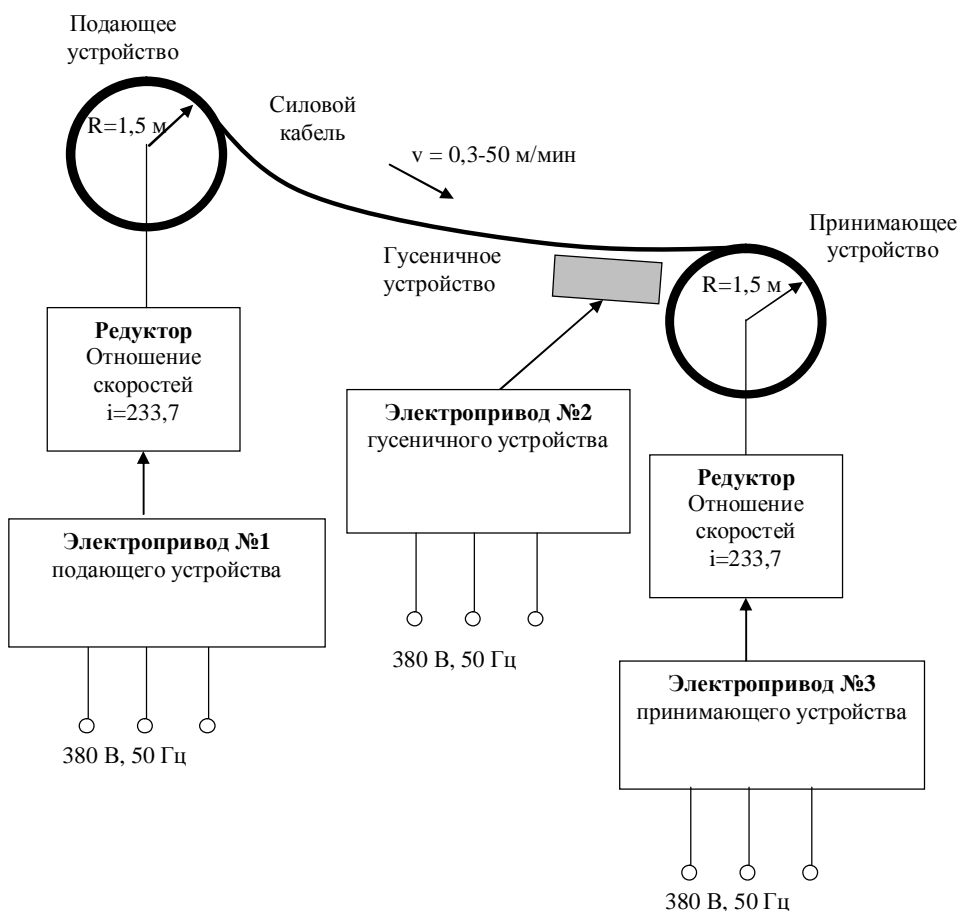


Рис.1.

Принцип работы линии, схема которой показана на рис. 1, заключается в следующем. Токопроводящая жила, намотанная на барабане подающего устройства, с помощью электропривода № 1 пропускается через тройную экструзионную головку, в которую подаются одновременно расплавы полиэтиленовой изоляции и полупроводящего полимера. Головка имеет три экструдера разной производительности: один (наибольшей производительности) – для нанесения слоя полиэтиленовой изоляции, и два – для формирования полупроводящих полимерных слоев.

Для того чтобы жидкий слой расплавленного полиэтилена меньше смещался отно-

нительно оси жилы, дополнительно применяется устройство ее подкручивания. Оно подкручивает жилу в направлении скрутки ее проволоки приблизительно с шагом, равным одному обороту жилы вокруг ее оси на 30 погонных метров ее длины. Это дает возможность получать цилиндрическое изделие с коркой затвердевшего полиэтилена на его поверхности и избегать смещения полимерных полупроводящих и изоляционных слоев относительно оси токопроводящей жилы, то есть избегать эксцентриситета полимерных слоев. Возможность реализации такой технологии обеспечивается специальной конфигурацией наклонной вулканизационной трубы. Начальная часть трубы, в которой полимерные слои на жиле еще достаточно жидкие, является практически вертикальной. Затем труба изгибается и в конечной своей части, в которой полимерные слои на жиле уже достаточно затвердели, становится почти горизонтальной. Изгиб и сечение трубы выбираются из условий недопустимости касания ее внутренней поверхности полимерными слоями токопроводящей жилы при всех изменениях ее сечения, массы, толщины полимерных слоев и скорости линейного перемещения.

Токопроводящую жилу с нанесенными на нее полимерными слоями, которая должна перемещаться в центральной части вулканизационной трубы, можно рассматривать как тяжелую материальную нить. Угол  $\alpha$  между осью абсцисс и линией, соединяющей начало координат и точку с координатами  $(x, y)$ , как известно из механики, можно определить из выражения  $tg\alpha = gx/H$ , где  $g$  – вес тяжелой материальной нити на единицу длины и  $H$  – натяжение в самой низкой точке.

Поскольку при изготовлении изолированных жил кабеля разных сечений и на разные напряжения величина  $g$  изменяется, то будет изменяться и профиль провисания нити:  $y = x^2/c$ , где  $c = H/g$  – постоянная провисания.

Из приведенных уравнений видно, что сохранить профиль провисания нити можно, если постоянная провисания  $c$  будет неизменной. Такое сохранение профиля возможно реализовать за счет регулирования силы натяжения  $H$  и соответственно регулирования момента на валу двигателя привода № 2 (рис. 1), приводящего в движение гусеничное тяговое устройство при постоянной технологической скорости  $V$  движения жилы в вулканизационной трубе. Неизменность скорости движения жилы обеспечивается регулированием момента тягового электродвигателя. Указанные соотношения положены в основу системы управления движением токопроводящей жилы внутри вулканизационной трубы, изгиб которой определяется из уравнений провисания жилы как материальной тяжелой нити.

**Постановка задачи и разработка Simulink-модели электромеханической системы.** Исследуется электромеханическая система, показанная на рис. 1 и содержащая три электропривода, выполненные на основе асинхронных двигателей с векторным управлением. Приводы № 1 и № 3 приводят в движение барабаны подающего и принимающего устройств и обеспечивают движение кабеля с постоянной скоростью  $V$ , задаваемой технологическими условиями. Привод №2 приводит в движение гусеничное тяговое устройство и обеспечивает требуемое натяжение кабеля  $H$  при его движении внутри вулканизационной трубы. Все приводы построены по принципу прямого управления моментом и потоком асинхронного двигателя (метод DTC), описанному в работах [1,8,16].

В работе для исследования электромагнитных процессов в указанной системе была разработана математическая модель с использованием пакета прикладных программ Matlab/Simulink. Эта Simulink-модель системы с двумя электроприводами с векторным управлением показана на рис. 2.

В данной модели действие двух приводов №1 и №3, обеспечивающих заданную скорость перемещения кабеля, заменено эквивалентным действием одного привода, поэтому при моделировании рассматривается система, состоящая из двух приводов. В модели имеется привод принимающего устройства, обеспечивающий заданную скорость вращения вала асинхронного двигателя, и, следовательно, заданную скорость протяжки кабеля. Также содержится привод гусеничного устройства № 2, создающий заданный момент на валу двигателя, а, следовательно, и заданную силу натяжения кабеля. Оба привода подключены к трехфазному источнику питания. Для моделирования режима кратковременного провала напряжения сети к этому источнику кратковременно с помощью ключа подключается дополнительная активная трехфазная нагрузка. Для визуализации результатов расчета используются блоки виртуальных осциллографов Display пакета Simulink, входы которых подключаются к соответствующим линиям связи.

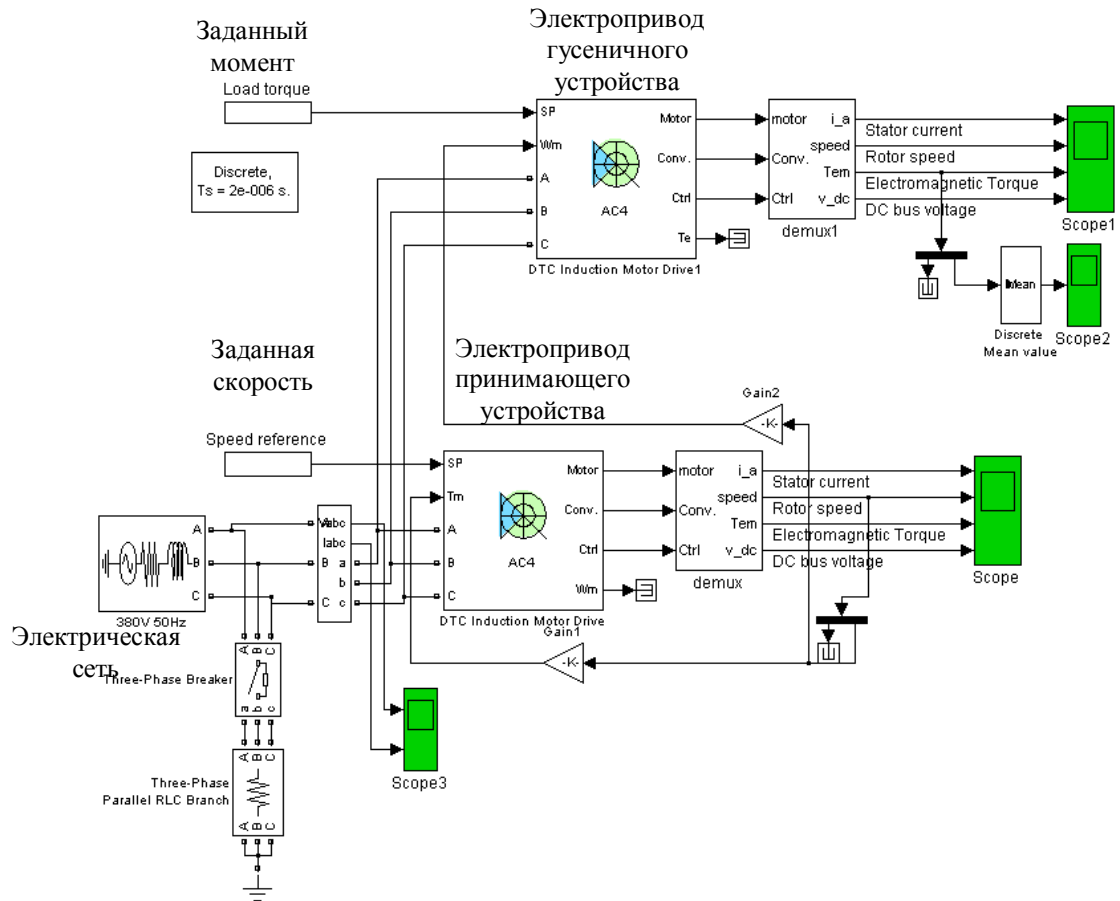


Рис. 2

Каждый из двух блоков привода моделирует работу электрического привода на основе асинхронного двигателя с векторным управлением. Simulink-модель электрического привода, принимающего устройства, показана на рис. 3.

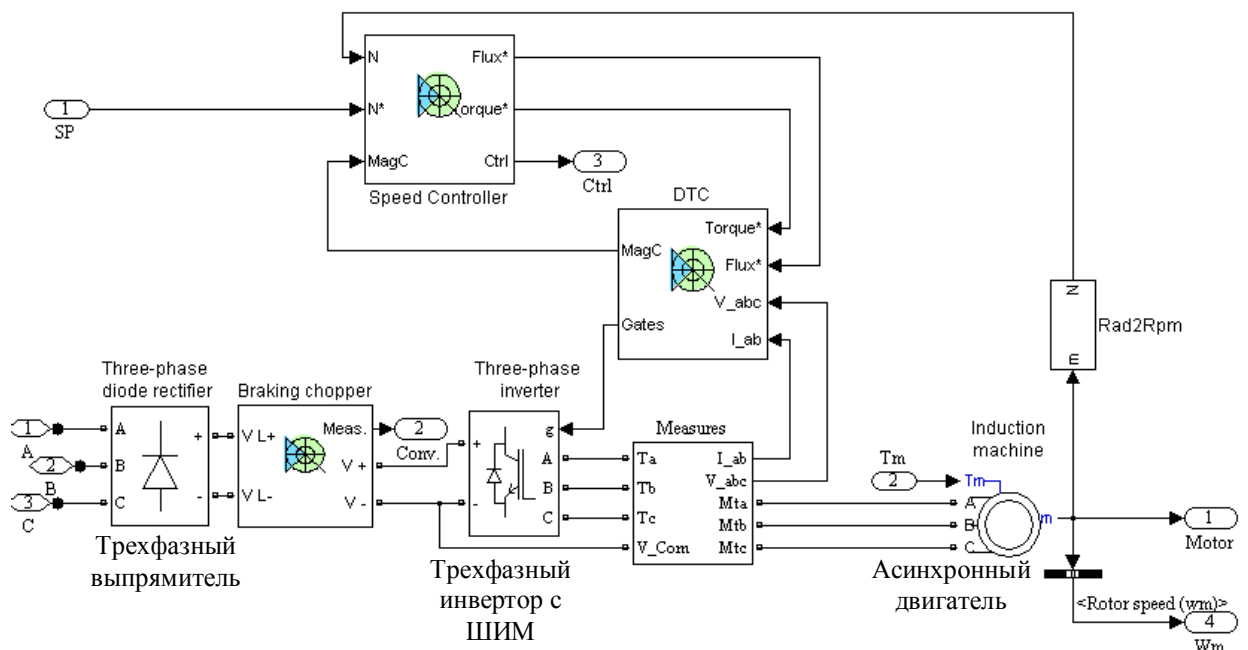


Рис. 3

Эта модель содержит неуправляемый трехфазный выпрямитель, трехфазный инвертор с широтно-импульсной модуляцией тока (ШИМ), асинхронный двигатель, контроллер скорости и блок управления инвертора. Для исключения перенапряжения на выходе выпрямителя при работе двигателя в режиме генерации электрической энергии между выпрямителем и инвертором расположен специальный блок – "чоппер", обеспечивающий подключение резистора, шунтирующего накопительную емкость при превышении напряжения на ней заданного значения. Блок-схема привода, реализованного по методу ДТС, приведена в [7,17].

Используемая в работе математическая модель асинхронной машины состояла из электрической части, представленной моделью пространства состояний четвертого порядка, и модели механической части в виде системы второго порядка. Все электрические переменные и параметры машины приводились к статору.

Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной системы координат (оси  $d$ - $q$ ) и имеют вид:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} - \omega \varphi_{ds}; \quad V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs};$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}; \quad V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}; \quad T_e = 1,5(\varphi_{ds} i_{ds} - \varphi_{qs} i_{ds}),$$

$$\text{где } \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}; \quad \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}; \quad \varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}; \quad \varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds};$$

$$L_s = L_{ls} + L_m; \quad L'_r = L'_{lr} + L_m.$$

Механическая часть машины описывалась двумя уравнениями

$$d\omega/dt = (T_e - F\omega - T_m)/J, \quad d\theta/dt = \omega.$$

В уравнениях использованы следующие обозначения:  $R_s$ ,  $L_{ls}$  и  $R'_r$ ,  $L'_{lr}$  – сопротивления и индуктивности рассеяния статора и ротора;  $L_m$  – индуктивность цепи намагничивания;  $L_s$ ,  $L'_r$  – полные индуктивности статора и ротора;  $V_{qs}$ ,  $i_{qs}$  и  $V'_{qr}$ ,  $i'_{qr}$  – проекции напряжений и токов статора и ротора на ось  $q$ ;  $V_{ds}$ ,  $i_{ds}$  и  $V'_{dr}$ ,  $i'_{dr}$  – проекции напряжений и токов статора и ротора на ось  $d$ ;  $\varphi_{ds}$ ,  $\varphi_{qs}$  и  $\varphi'_{dr}$ ,  $\varphi'_{qr}$  – проекции потокоцеплений статора и ротора на оси  $d$  и  $q$ ;  $\omega$  – угловая скорость ротора;  $\theta$  – угловое положение ротора;  $J$  – момент инерции ротора;  $T_e$  – электромагнитный момент двигателя;  $T_m$  – статический момент нагрузки;  $F$  – коэффициент трения.

Эта математическая модель положена в основу разработанной в пакете Simulink и использованной в данной работе виртуальной модели асинхронной машины. В окно задания параметров этой виртуальной модели заносился ряд параметров, которые вычислялись по паспортным данным машины на основе методики, описанной в работе [5]. При этом в приводе принимающего устройства использовался асинхронный двигатель RA160MA4 (11 кВт, 1460 об/мин), а в приводе гусеничного шасси – RA132S2 (5,5 кВт, 1455 об/мин). Управляюще-информационный канал электропривода также реализован с помощью блоков пакета Simulink.

**Анализ результатов моделирования.** На рис. 4 и 5 показаны временные диаграммы основных характеристик двух приводов за исследуемый промежуток времени – 2 с, соответствующий режиму пуска, а именно: зависящие от времени ток статорной обмотки двигателя, частота вращения ротора, электромагнитный момент на валу двигателя и опорное напряжение на входе инвертора для случая стабильных параметров питающей сети или сети с бесконечно большой мощностью.

Из рисунков видно следующее.

– Ток в статоре обоих двигателей в процессе пуска изменяется по амплитуде и частоте, причем, на начальном участке частота низкая и постепенно нарастает по мере разгона двигателя. Именно такой режим пуска характеризуется малыми затратами энергии.

– Двигатель принимающего привода монотонно разгоняется до заданной частоты вращения – 1200 об/мин за время, равное 1,35 с, и затем с высокой точностью обрабатывает эту заданную частоту вращения на последующем временном интервале (рис. 4).

– Привод гусеничного устройства на всем временном интервале с высокой точностью обрабатывает заданную величину электромагнитного момента (10 Н·м) (рис. 5). Такое регулирование электромагнитного момента привода гусеничного устройства обеспечивает необходимое натяжение кабеля в вулканизационной трубе.

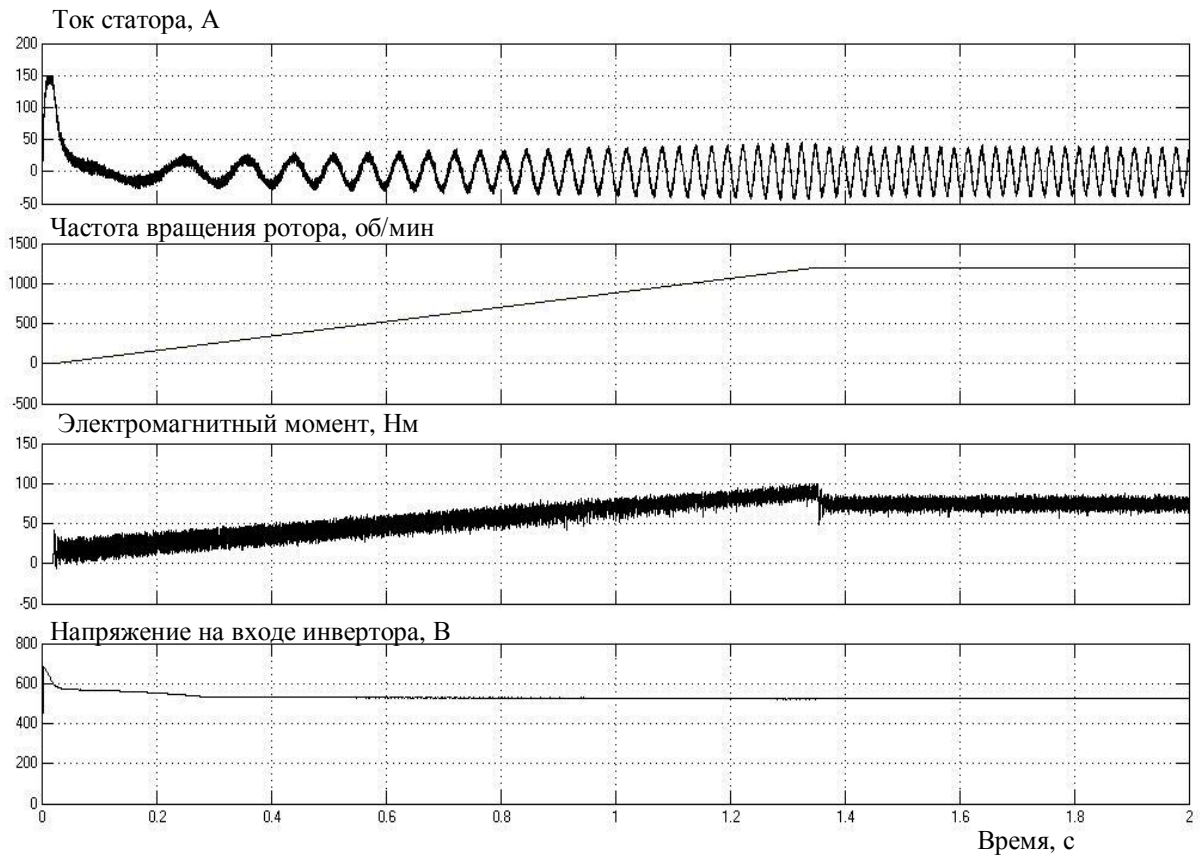


Рис. 4

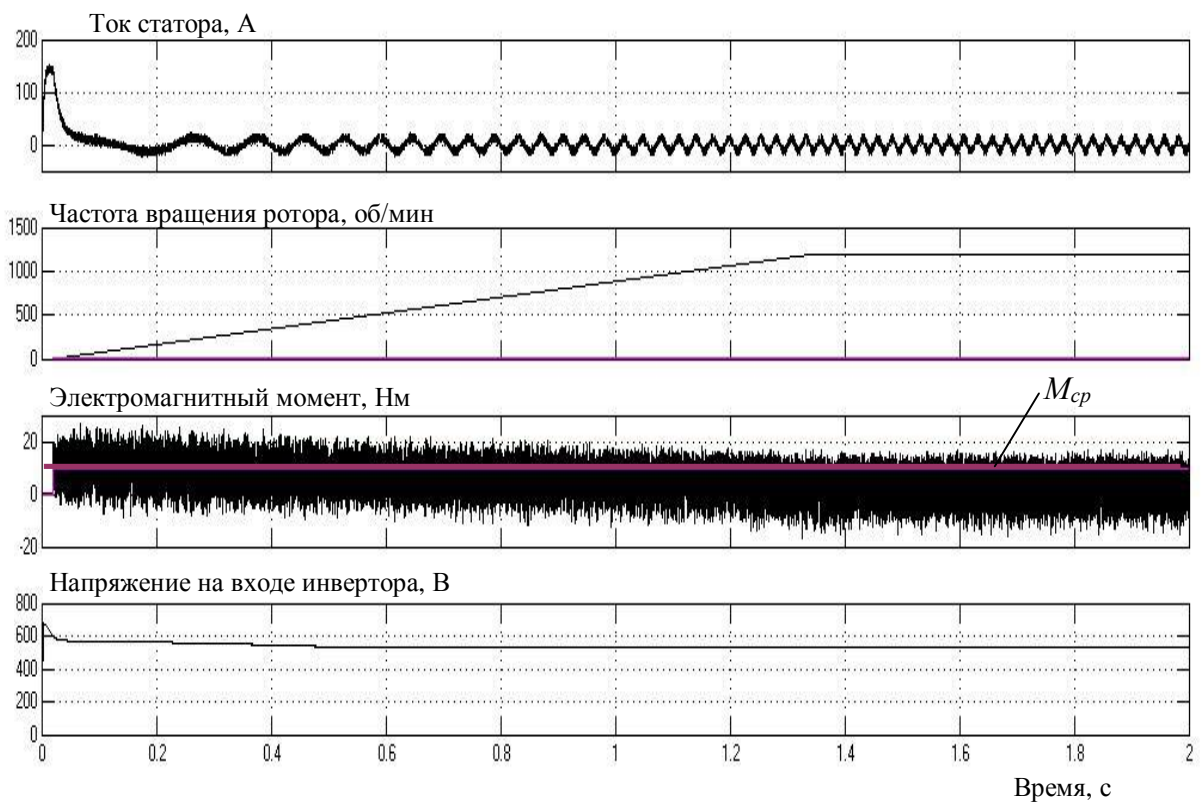


Рис. 5

На следующем этапе выполнялось моделирование динамических процессов в приводах при кратковременном (0,2 с) провале напряжения сети от амплитудного значения  $u_0$  до значения  $u_0 - \Delta u$ ,

причем  $\Delta u/u_0=0,54$ . Результаты расчета этих процессов для привода принимающего устройства показаны на рис. 6.

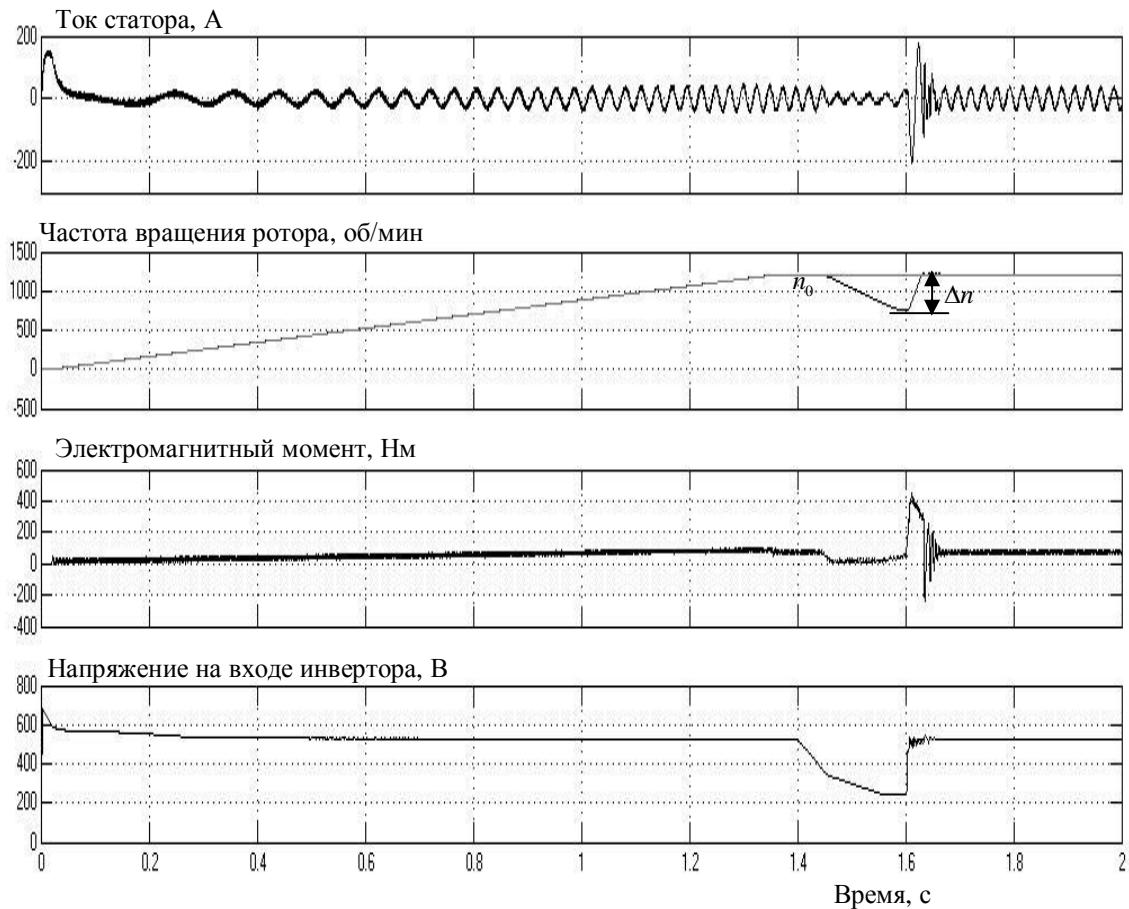


Рис. 6.

Из рис. 6 видно, что на участке провала напряжения (промежуток времени 1,4–1,6 с) уменьшаются напряжение на входе инвертора и величина тока в статорной обмотке двигателя, однако при этом система векторного управления обеспечивает увеличение электромагнитного момента с тем, чтобы отработать заданную частоту вращения. Видно, что при таком провале напряжения электро-механическая система, несмотря на повышение момента, не в состоянии отработать заданную частоту вращения ротора, которая уменьшается в конце этого промежутка времени на величину  $\Delta n \approx 430$  об/мин. Для получения количественной зависимости относительного уменьшения скорости ротора  $\Delta n/n_0$  от относительного уменьшения напряжения сети  $\Delta u/u_0$  в работе выполнялся расчет при раз-

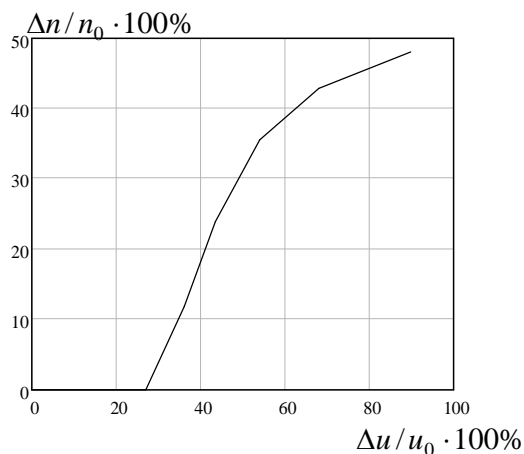


Рис. 7

личных значениях дополнительно подключаемой к сети нагрузки (блок внизу схемы на рис. 2). Результаты расчетов такой зависимости показаны на рис. 7.

Как видно из этого рисунка, существует пороговое значение величины провала напряжения  $\Delta u/u_0 \cdot 100\% = 27\%$ , ниже которого привод обеспечивает стабилизацию заданной скорости с высокой точностью. При превышении этой величины наблюдается рост относительной скорости ротора  $\Delta n/n_0$ , то есть привод не обеспечивает стабилизацию заданной скорости. Полученные данные по пороговому значению провала напряжения позволяют сформулировать требования к параметрам систем элект-

троснабжения с учетом возможного подключения к ним дополнительных силовых нагрузок.

**Выводы.** 1. Разработана Simulink-модель для исследования динамических процессов в электромеханической системе, используемой в технологической линии для экструзионного нанесения полиэтиленовой изоляции и полупроводящих полимерных слоев на токопроводящую жилу сверхвысоковольтных кабелей. Исследуемая система включает электрические приводы на основе частотно-управляемых асинхронных двигателей и их нагрузку – перемещающуюся с необходимой скоростью и натяжением токопроводящую жилу, наклонное провисание которой может рассматриваться как наклонное провисание тяжелой материальной нити. Компьютерное моделирование выполнено с использованием пакета прикладных программ Matlab/Simulink/ SimPowerSystems.

2. Проведено согласование электрических и механических параметров системы и выполнен анализ возникающих в ней динамических процессов. Показано, что изменение конфигурации и скорости движения провисающей токопроводящей жилы с нанесенными на нее полимерными слоями зависит от удельной массы жилы на единицу длины, ее натяжения в самой низкой точке и момента тягового электродвигателя. Определено, что при критической массе токопроводящей жилы электромеханическая система позволяет стабилизировать скорость перемещения жилы с необходимой точностью при кратковременных провалах питающего напряжения не более чем 27 % от его амплитудного значения. Это является одним из основных требований к параметрам систем электроснабжения с учетом возможного подключения к ним дополнительных силовых нагрузок.

1. *Браславский И.Я., Ишиматов З.Ш., Барац Е.И.* Адаптивная система прямого управления моментом асинхронного двигателя // *Электротехника*. – 2001. – № 11. – С. 35–39.
2. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001.–320 с.
3. *Герман-Галкин С.Г.* Силовая электроника / Лабораторные работы на ПК. – С.-Пб.: КОРОНА принт, 2002. – 304 с.
4. *Герман-Галкин С.Г.* Matlab/Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – С.-Пб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
5. *Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А.* Электрические машины / Лабораторные работы на ПК. – С.-Пб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с.
6. *Козярук А.Е., Рудаков В.В.* Современное состояние и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – С.-Пб.: СПЭК, 2004. – 64 с.
7. *Описание приложения SimPowerSystems.* - [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).
8. *Пересада С.М.* Нелинейное и адаптивное управление в электромеханических системах с векторно-управляемыми электродвигателями: Дисс. докт.техн.наук / НАН Украины, Ин-т электродинамики. – Киев, 2007. – Т.1. – 472 с.
9. *Пивняк Г.Г., Волков А.В.* Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с частотно-импульсной модуляцией. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 468 с.
10. *Усольцев А.А.* Векторное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла. С.-Пб. гос. ин-т точной механики и оптики (техн. ун-т), 2002. – 43с.
11. *Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я.* Исследование динамики и энергетических показателей асинхронного электропривода с векторным управлением методом виртуального моделирования // *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ"*. – 2008. – №30. – С. 41–45.
12. *Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А.* Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224.
13. *Эпштейн И.И.* Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 192 с.
14. *Bose B.K.* Power Electronics and Motor Drives. – Elsevier, 2006. – 917 p.
15. *Krause P.C., Wasynczuk O., Scott D.S.* Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. – Wiley-Interscience, 2002. – 632 p.
16. *Nash J.N.* Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control Without an Encoder // *IEEE Trans. Industry Applications*. – 1997. – V.33. – № 2. – Pp. 333–341.
17. *Trzynadlowski A.* Control of Induction Motors. – Academic Press, 2001. – 225 p.

Надійшла 12.01.2010